第27卷　第4期　2015年7月
腐蚀科学与防护技术
CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY
Vol.27　No.4　Jul.　2015

经验交流

飞机某接头应力腐蚀与防护

邓承佯　徐环宇　王建华　吉先武　窦　军

中航工业洪都飞机设计研究所　南昌　330024

摘要: 针对飞机某接头失效问题进行了研究，通过对裂纹产生原因的分析，确定了接头部位的腐蚀特征；论述了裂纹萌发和扩展的主要机理，并对影响腐蚀的因素进行了探讨；同时提出了切实可行的改进措施，为航空领域同类LD5铝合金部位的防腐提供了可以借鉴的经验。

关键词: 航空材料　LD5铝合金　应力腐蚀裂纹

中图分类号: TG172　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002-6495(2015)04-0393-03

1 前言

LD5合金是目前航空航天应用最为广泛的一类Al-Mg-Si-Cu系铝合金，抗拉强度高达400 MPa，具有耐蚀性能好、比强度高等特点，在国民经济许多领域均得到了广泛的应用。目前，LD5铝合金已成为航空领域最重要的材料之一。但在铝合金的应用过程中，铝合金往往会因其对环境酸碱度敏感度高而易发生局部应力腐蚀现象，造成相应的部件失效，从而为飞机的飞行安全埋下隐患，因此采取合理有效的措施来遏制应力腐蚀非常必要。

在飞机定检过程中，发现部分LD5铝合金部位出现了不同程度得的腐蚀现象，因此如何解决铝合金高强度与低抗应力腐蚀的问题就成为了关键所在。近年来，众多研究者对该系铝合金进行了许多研究[1]，但始终缺乏全面系统的探究。因此本文从典型腐蚀案例出发，从显微分析和应力场分析等对接头的腐蚀现象进行研究，总结其出现应力腐蚀的机理，并提出相应的防护措施，为预防该类材料腐蚀的再次发生提供重要的参考。

2 腐蚀案例介绍

在对飞机进行日常维护过程中，发现了框接头处出现了较为明显的裂纹。裂纹主要出现在连接孔的周围。孔壁发现有金属卷边及毛刺，涂覆的漆层也发生了破损。将螺栓孔沿裂纹打开，用带能谱的TESCAN VEGA II LMU型扫描电子显微镜对断口形貌和腐蚀产物元素进行分析，同时采用8节点6面体单元建立接头有限元应力分析模型进行模拟分析。接头处所使用的材料为YS/T439-2001标准的LD5铝合金，其主要化学成分 (质量分数，%) 为：Cu 1.8~2.6、Mn 0.4~0.8、Mg 0.4~0.8、Si 0.7~1.2，余为Al。

在对飞机服役环境进行的专门检测中发现，该地区露水中Cl^-浓度为40 mg/L，H_2SO_4浓度为110 mg/L。同时飞机服役的环境昼夜温差较大，零件表面易沉积溶有H_2SO_4和Cl^-的酸性冷凝水，加上当地气候干燥，风沙较大，沙砾极易损坏接头涂覆的漆层和铝表面原有的氧化保护层。

3 检测结果与分析

3.1 受载分析

接头处的应力场如图1所示，通过分析得知，接头所受的应力均小于其屈服强度 ($\sigma_b \geq 365$ MPa)，因而并非是外加应力过高诱发的裂纹。而金属材料在长期处于低应力场作用时，其组织就会出现位错滑移现象[2]。其结果就会在零件表面形成微小的凹坑，破坏铝合金表面原有的氧化层 (图2)，内部未氧化的Al就会暴露在空气当中。而凹坑处纯Al的表面能极高，极易与氧化物质等发生相互作用形成氧

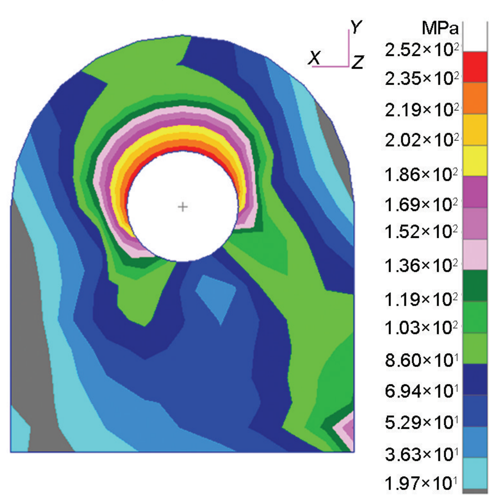


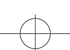
图1 接头应力场分布

定稿日期: 2014-09-05

作者简介: 邓承佯，男，1992年生，助理工程师

通讯作者: 邓承佯，E-mail: an123yi@126.com，研究方向为飞机结构腐蚀

DOI: 10.11903/1002.6495.2014.276



化物层，以降低其表面能。钱云平等[5]研究指出，在100 g/L以下的H_2SO_4浓度和30 ℃以上的温度下，Al形成的氧化铝薄膜很薄，因而在该服役环境下，新形成的薄氧化膜极易在应力场的作用下发生二次破裂从而形成裂纹源。

3.2 断口形貌分析

对断口部位进行显微分析可知，其形貌未出现疲劳腐蚀的海滩花样特征 (图3a)。金相分析显示其裂纹呈现的是典型的分支，或不分枝且多条的应力腐蚀裂纹[6]标志 (图3b)，因此该部位是应力腐蚀裂纹而非疲劳腐蚀裂纹或外加应力一次破裂裂纹。

3.3 断口腐蚀产物分析

对断口腐蚀产物进行能谱分析发现，腐蚀产物存在大量氧化物和少量氯化物，这说明铝与环境中

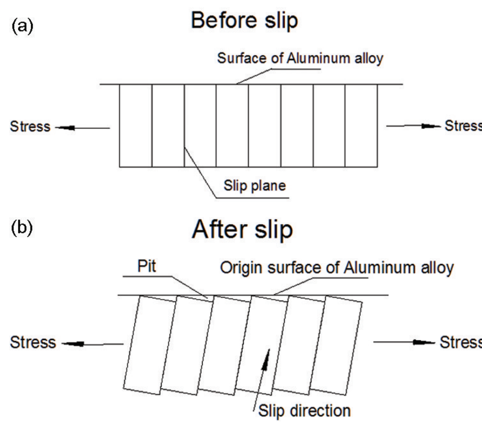


图2 铝位错滑移前 (a) 和后 (b) 示意图

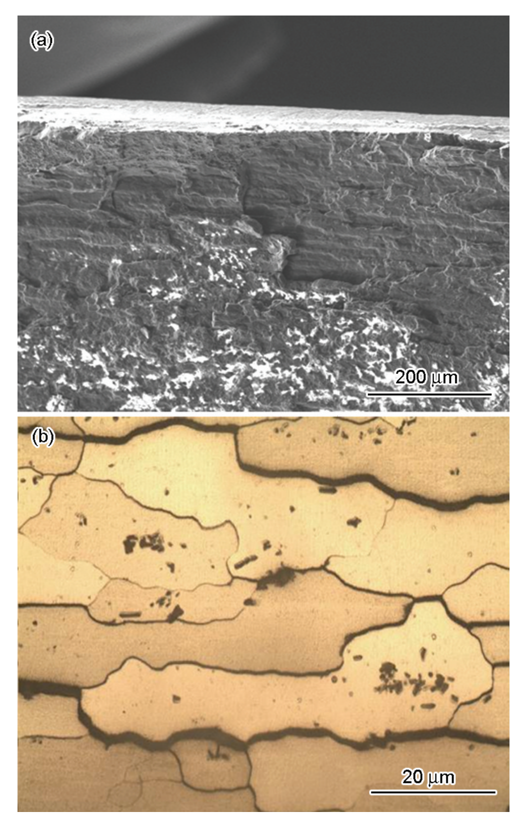


图3 断口形貌 (a) 和金相组织 (b)

的腐蚀液的确发生了电化学反应，裂纹源发展遵循电化学反应机制。

铝与和凹坑处聚集残留的溶有H_2SO_4和Cl^-的酸性腐蚀液发生电化学反应时会形成Al^{3+}和游离态的H：

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^- \quad (1)$$

$$H^+ + e^- \rightarrow H \quad (2)$$

因而作为阳极的Al不断溶解形成Al^{3+}，溶液当中的Cl^-就会与Al^{3+}形成$AlCl_3$，在水溶液中，$AlCl_3$又会进一步发生水解：

$$AlCl_3 + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3\downarrow + 3HCl \quad (3)$$

产物中的HCl又会进一步使得溶液的pH值下降，从而不断促进和加快阴极反应生成游离态H。而游离态H会富集在裂纹尖端进而不断深入金属内部，当尖端附近富集的游离态H浓度达到一定程度时，尖端便就会发生氢致脆性开裂[7]，导致应力腐蚀裂纹。

3.4 裂纹扩展机制

随着凹坑中铝与腐蚀液的电化学反应的不断进行，阳极反应生成的Al^{3+}也会和H_2O发生水化反应[2]生成$Al(OH)^{2+}$：

$$Al^{3+} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+ \quad (4)$$

该反应的进行同样使得溶液的pH值下降，而生成$Al(OH)^{2+}$会进一步与Cl^-和H_2O发生水化反应生成$Al(OH)_2Cl$和$Al(OH)_3\cdot H_2O$等胶质：

$$Al(OH)^{2+} + H_2O + Cl^- \rightarrow Al(OH)_2Cl\downarrow + H^+ \quad (5)$$

$$Al(OH)^{2+} + 4H_2O \rightarrow Al(OH)_3\cdot H_2O\downarrow + 2H^+ \quad (6)$$

该反应同样会降低溶液的pH值，而生成的$Al(OH)_2Cl$和$Al(OH)_3\cdot H_2O$等胶质物质随着反应的发生就会不断析出附着在裂纹内壁上，从物理上隔绝了裂纹侧壁铝的电化学反应，从而终止了裂纹侧壁腐蚀深入 (图4上图)，最终迫使只有裂纹尖端继续发生电化学反应，导致裂纹不断深入发展形成应力腐蚀裂纹 (图4左下图)。

因此在LD5铝合金应力腐蚀过程中，裂纹尖端的电化学反应起着至关重要的作用。从裂纹形貌图中也可以发现，裂纹的侧壁上并没有明显附着腐蚀产物，而尖端底部则附着了较多的腐蚀产物，从而进

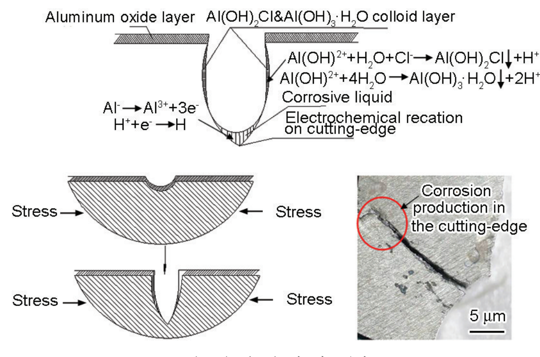
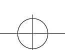
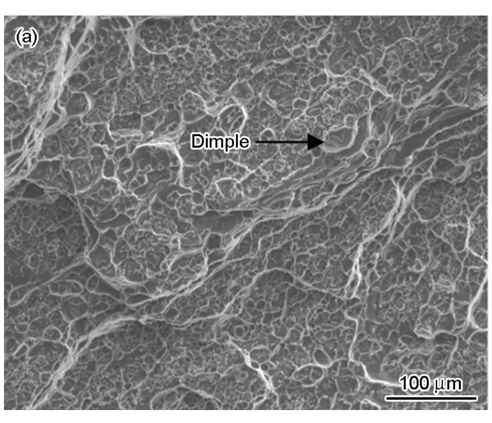


图4 铝合金应力腐蚀机理





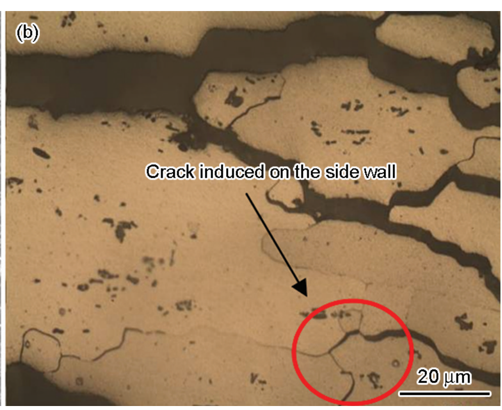


图5 断口偏析物对应力腐蚀的影响: (a) 远离裂纹处偏析物形成的韧窝结构, (b)偏析物引发的裂纹

一步验证了裂纹尖端对应力腐蚀的决定性影响。

4 影响应力腐蚀的因素

4.1 材料腐蚀倾向

从Al-Mg-Si相图[8]中可以看出，LD5铝合金处于Al+Mg_2Si+Si三相区。所以在热加工工艺中MgSi会形成析出Mg_2Si稳定相[9]，该化合物是时效强化相，能大大提高合金的耐腐蚀性能和热处理强度。然而形成Mg_2Si相的Mg和Si的理想含量比为1.7∶1[3]，一旦Si的成分含量过剩，便会形成硬且脆的游离态相附着在晶界处，从而降低Al-Mg-Si系铝合金的耐腐蚀性能[4]。因次就必须人为掺入其他元素来降低游离态Si的含量，查阅文献可知，Mn能优于Mg与Al和Si形成AlMnSi[1]，因此在Al-Mg-Si系铝合金系当中，游离态的Si与添加的Mn的理想含量为1∶1.96。

因而 m(Mg)∶m(Si)∶m(Mn)=1∶1.58∶1.96是最理想的含量比，但该系铝合金 m(Mg)∶m(Si)∶m(Mn)=(0.4~0.8)∶(0.7~1.2)∶(0.4~0.8)，因此在锻造过程当中控制Si的添加量清理含Si炉渣来控制Si的含量，并适当增加Mn的添加量，用以控制游离态Si相的含量。

4.2 偏析物对应力腐蚀的影响

成分中的Cu在锻造冷却过程中能和基体发生共晶反应形成$CuAl_2$二元化合物，该化合物属于时效强化相，由于工艺条件难以精确控制，析出的化合物相极易富集在晶界处形成第二相[10] (图5a)。因而易造成晶界处贫铜构成电位差，当腐蚀液不断渗入残留在晶界处时，Al便会成为阳极与腐蚀液发生电化学反应，进而不断溶解[4] (式1)。该反应释放出的电子不断迁移到微电池的阴极区 ($CuAl_2$区)就会与电解液中的H_2O和O_2发生反应：

$$O_2+2H_2O+4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad (7)$$

在溶液中，Al^{3+}和OH^-相遇就会生成白色的腐蚀产物$Al(OH)_3$：

$$Al^{3+}+3OH^- \rightarrow Al(OH)_3\downarrow \qquad (8)$$

因此晶界偏析物为应力腐蚀裂纹提供良好的诱发源，在长期受应力场和腐蚀介质的作用下同样会诱发应力腐蚀裂纹 (图5b)。

5 结论

(1) 接头部位裂纹应为应力腐蚀裂纹。

(2) 冶金过程中需要适当添加Mn来中和过量的Si，冶炼过程中需要控制工艺条件以减少偏析物富集。

(3) 装配过程中，控制拧紧力矩，尽量降低预紧力，并调整衬套和接头处的孔轴配合过盈量，尽可能降低残余内应力。

(4) 零部件表面毛刺需要及时修整，并定期清除零件表面的腐蚀液，保持表面干燥，同时适当加盖黑色帆布遮蔽紫外线。

(5) 日常维护过程中需要检查零部件表面的防护层情况，必要时零部件表面可以适当考虑增涂防护漆层，尤其是防护层破损处，需要及时均匀增涂防护漆层。

参考文献

[1] 褚武扬, 谷飚, 高克玮. 应力腐蚀机理研究的新进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(2): 97

[2] 杜爱华, 龙晋明, 裴何中. 高强铝合金应力腐蚀研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 251

[3] 朱玉俭, 丁荞亚, 王永德. 铝合金圆铸锭水平半连续铸造实践 [J]. 江苏冶金, 1994, 5: 48

[4] 宋仁国, 曾梅光, 张宝金等. 7050铝合金晶界偏析与应力腐蚀、疲劳腐蚀行为的研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1996, 16(1): 1

[5] 钱云平, 陈洪, 李尧. LD5铝合金阳极氧化工艺条件对氧化膜质量的影响 [J]. 表面技术, 2000, 29(2): 12

[6] Song R G, Dietzel W. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Acta Mater., 2004, 52 (16): 4727

[7] 陈小明, 宋仁国. 7000系铝合金应力腐蚀开裂的研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(2): 120

[8] 李晶, 金曼, 费玥等. Al-Mg-Si系铝合金的成分设计 [J]. 机械工程材料, 2005, 30(9): 35

[9] 张国英, 张辉, 方戈亮等. Al-Zn-Mg-Cu系铝合金中不同区域电子结构及应力腐蚀机理分析 [J]. 金属学报, 2009, 45(6): 687

[10] 张宇, 宋仁国, 唐普洪. 7075铝合金氢脆敏感性与Mg-H相互作用 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(5): 364

